자력검층을 이용한 파일 심도 예측
Pile Depth Prediction by Magnetic Logging

김진후[1], Jin-Hoo Kim

[1] 동아대학교 토목·해양공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Ocean Engineering, Dong-A University

SYNOPSIS : In order to predict depth of the pile forward modeling and inversion of magnetic logging data was conducted by using a finite line of dipoles model. The horizontal component as well as the vertical component of magnetic fields can be measured in the borehole, and the magnetic anomalies can be obtained by subtracting the Earth's magnetic field from the measurement. The magnetic anomalies of the pile are considered as vector sum of induced magnetization due to the Earth's magnetic field and remnant magnetization possessed by steel strings in the pile. The magnetic anomalies are used as input data for inversion from which the length, the magnetic moment per unit length, and the dip angle of the pile can be obtained. From the inversion of synthetic noisy data, and the data obtained from the field model test it is found that the driving depth of the pile can be determined as close to the order of measuring interval (5~10cm). It is also found that the resultant magnetic anomalies due to an individual steel string in the pile are almost same as those due to a group of steel strings located at the center of the pile. The magnetic logging method also can be used for locating reinforced bars, pipes, and steel casings.

Key words : pile depth, magnetic logging, forward modeling, inversion, a finite line of dipoles

1. 서 론

토목 및 건축구조물이 점점 대형화되는 추세에서 구조물 하부에 위치한 파일의 심도를 파악하는 것은 구조물 시공 중 또는 시공 후의 구조물에 대한 안정성을 검토하고 부실시공을 사전에 예방한다는 관점에서 매우 중요하다. 따라서 파일 심도 파악에 적합한 현장 적용성이 있는 객관적인 평가방법의 도입이 필요한 실정이다. 탄성파를 이용한 콘크리트 파일 또는 현장타설 말뚝의 심도 파악에는 충격반향(impact echo: IE) 기법(김동수외, 1998) , 탄성파 주시기법, 수평검측기법 (우제윤, 1995) 등이 사용될 수 있으나 이러한 방법들은 파일 상부에 스라브 등 이미 구조물이 축조되어 있는 경우, 탄성파 에너지가 주위의 잡음에 비해 상대적으로 작은 경우, 콘크리트와 주위 지반의 탄성파 속도 차이가 작은 경우, 조사를 위한 적절한 위치에 천공을 할 수 없는 경우 등에는 적용이 제한적이거나 불가능할 수도 있다.

자력검층은 지질구조 연구와 지하자원 탐사 및 자성체 탐사 등에 사용되던 지표 자력탐사를 시추공 내에서 수행하는 방법으로 잔류자기 검층에 의한 지층 구분(Desvignes *et al.*, 1992) 등이 시도되었다. 자력검층을 통한 파일 위치 파악을 위하여 파일을 프리즘 형상으로 모델화하고 이에 대한 반응곡선 계산과 역산을 수행한 연구(차영호외, 1999; 정현기외, 1999)가 최근에 발표되었으며, 현장 적용성도 입증되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 프리즘 형상이 아닌 유한한 길이의 선형 자기쌍극자 모델을 이용하여 자력검층에 대한 반응곡선 계산과 역산을 수행하고, 이를 이용한 파일 심도 예측을 시도하였다. 유한 선형 자기 쌍극자 모델은 중요한 3차원 모델의 하나로서, 폭이 좁고 길이가 유한한 파일이나 철근 등과 같은 자성체에 대한 자력검층에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단되어 이 모델을 선택하게 되었다. 특히 이 모델은 파일이 놓인 평면에 검측공이 위치해야 되는 등의 제약조건이 없으며, 지자장과 무관하게 임의방향으로 자성체가 자화되어 있어도 계산이 가능한 장점을 지니고 있다.

본 연구는 크게 유한 선형 자기쌍극자에 대한 자력검층 반응곡선의 계산과 수치모의실험, 실내 모의실험 및 현장실험에 대한 검층자료의 해석으로 구성된다. 자력검층 반응곡선의 계산은 주어진 지자장 및 단위 길이당 자기모멘트에 대하여 자성체의 경사방향 및 경사각, 편각 및 복각, 자성체의 위치 변화에 따른 자기이상(magnetic anomaly)값의 계산으로 이루어진다. 한편, 수치모의 실험에서는 이미 알고 있는 자성체 모델에 대한 자기이상을 계산하고, 여기에 측정에 따른 무작위 오차를 더한 다음 이를 이용하여 자성체 모델을 역으로 예측하여 알고 있는 자성체 모델과 비교하였다. 실내 모의실험에서는 2개의 철근을 이용하여 검층을 수행하였는데, 철근의 자화방향 중 복각 방향이 지자기의 복각 방향과 일치하는 경우와 그와 반대인 경우에 대한 해석을 시도하였다. 현장실험에서는 철근콘크리트 파일의 일부를 땅에 묻고 주위에 검측공을 설치하여 자력검층을 실시한 후 이를 해석하여 파일의 심도를 예측하고 이를 실제 파일 심도와 비교하였다.

2. 자기이상 계산

2.1 단일 자성체

그림 1에서 보는 바와 같이 $Y-Z$평면상에 놓여 있는 자기쌍극자의 길이를 L_L, 경사각을 ϕ, 단위 길이당 자기모멘트를 M_L, 이의 방향 코사인을 (l, m, n)이라 하고 쌍극자의 상단부가 $(0,0,h_0)$에 위치할 때, 임의의 점 $P(x,y,z)$ 에서 관측되는 임의방향으로 자화된 유한 선형 자기쌍극자에 의한 자기이상은 다음과 같다(김진후외, 1998).

$$
\begin{aligned}
H_x = \; & G[(2cx - lp^2)u^3 + (3cxp^2 - lp^4)u + bxp^4]\Big|_{L=0}^{L=L_L}, \\
H_y = \; & G[(bp^2\cos\phi + 2ac\sin\phi - mp^2)u^3 + (3acp^2\sin\phi - mp^4)u \\
& + (ab\sin\phi + c\cos\phi)p^4]\Big|_{L=0}^{L=L_L}, \\
H_z = \; & G[(bp^2\sin\phi - 2ac\cos\phi - np^2)u^3 - (3acp^2\cos\phi + np^4)u \\
& - (ab\cos\phi - c\sin\phi)p^4]\Big|_{L=0}^{L=L_L},
\end{aligned}
\tag{1}
$$

여기서 $G = \dfrac{M_L}{p^4(u^2+p^2)^{3/2}}$, $u = L - (z-h_0)\sin\phi - y\cos\phi$, $a = y\sin\phi - (z-h_0)\cos\phi$,

$p^2 = a^2 + x^2$, $b = m\cos\phi + n\sin\phi$, $c = lx + ma\sin\phi - na\cos\phi$ 이며, $l = \cos I_L \sin(\theta - D_L)$, $m = \cos I_L \cos(\theta - D_L)$, $n = \sin I_L$ 이다. 여기서, D_L과 I_L은 각각 선형 자기쌍극자의 자화방향의 편각 및 복각이며, θ는 자기쌍극자를 포함하는 $Y-Z$평면의 주향이다. θ와 D_L은 지리적 북쪽 (X')을 기준으로 시계방향으로 측정한 각이다.

식 (1)의 관측점 $P(x, y, z)$는 XYZ좌표계에서 정의되고 있으므로 지리적 좌표계로 정의된 관측점 $P(x', y', z')$를 XYZ좌표계로 표현하기 위해서는 θ를 이용한 좌표변환 과정이 필요하다.

선형 자기쌍극자에 의한 자기이상은

$$\Delta H_h = H_x \sin(\theta - D_E) + H_y \cos(\theta - D_E),$$
$$\Delta H_z = H_z \tag{2}$$

와 같이 표현된다. 여기서 ΔH_h는 H_x와 H_y에 의한 자기이상의 수평성분이며, ΔH_z는 자기이상의 수직성분이고 D_E는 지자장의 편각이다.

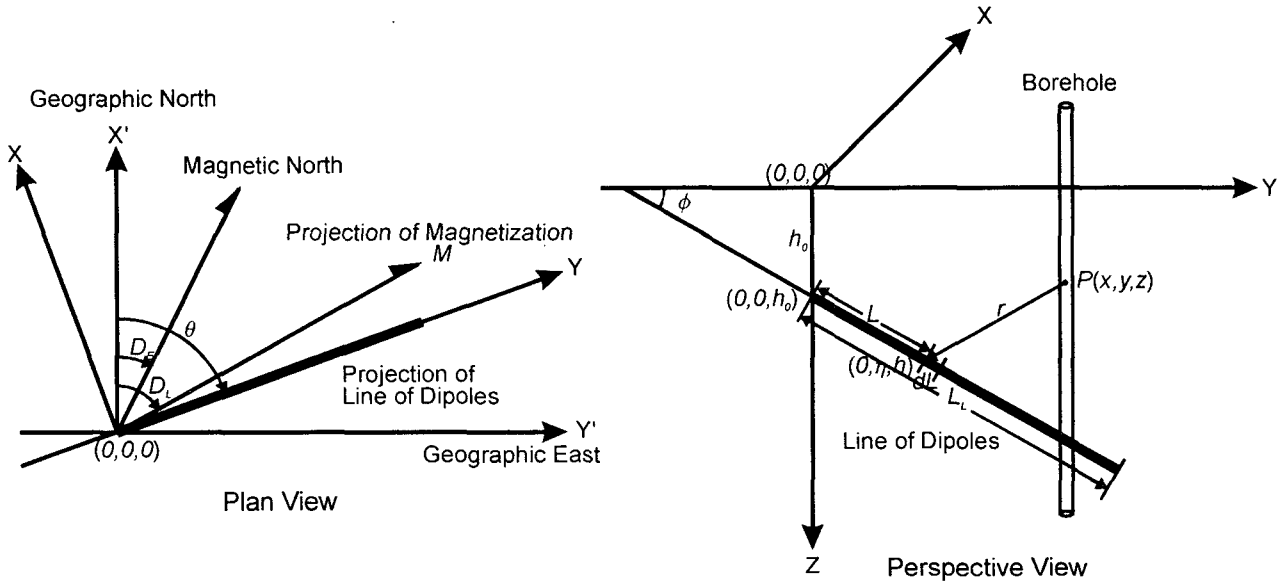

그림 1. 유한 선형 자기쌍극자 모델과 이 모델이 정의된 좌표계

그림 2는 선형 자성체 1개가 지하에 묻혀있는 경우에 대한 자력검층 반응곡선이다. 자성체 상단의 위치는 $x=0$ m, $y=0$ m, $h_0=5$ m 이며, 자성체의 길이는 10m 이고, 60° 의 기울기로 동쪽으로(y축 방향)경사져 있다고 가정하였다. 자성체의 단위 길이 당 자기모멘트는 20 A-m 이며, 편각 30° , 복각 45° 로 자화되어 있다고 가정하였다. 검측공은 자성체 상단에서 약 1.41m 떨어진 (-1.0, -1.0)에 위치한다.

그림 2에서 보듯이 자성체 상단이 위치한 5m 부근에서 자기이상의 수평성분 및 수직성분이 크게 변함을 알 수 있다. 자기이상의 수평성분은 자성체 상단 위치에서 대략 선대칭의 모습을 보이나, 수직성분은 대략 점대칭의 모습을 보인다. 따라서 수평성분의 극대 또는 극소점과 수직성분의 변곡점 등을 이용하여 검층자료를 현장에서 개략적으로 해석할 수도 있으며, 역산을 위한 초기모델 설정에도 활용이 가능하다. 자성체의 하단은 13.66m에 위치하나 이 부근에서 자기이상은 거의 관측되지 않고 있다. 이는 자성체가 경사져 있는 관계로 자성체 하단과 검측공 사이의 거리가 6.08m 떨어져 있어 자기이상 값이 매우 작기 때문이다.

2.2 그룹 자성체

콘크리트 파일에는 일반적으로 수 개의 강철선이 일정한 간격으로 들어 있으며, 개개의 강철선은 선형 자성체로 볼 수 있다. 따라서 검측공과 콘크리트 파일의 거리가 가까운 경우에는 각 강철선의 위치

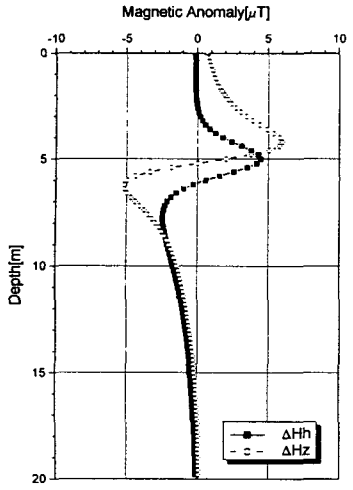

그림 2. 단일 자성체에 대한 자기이상

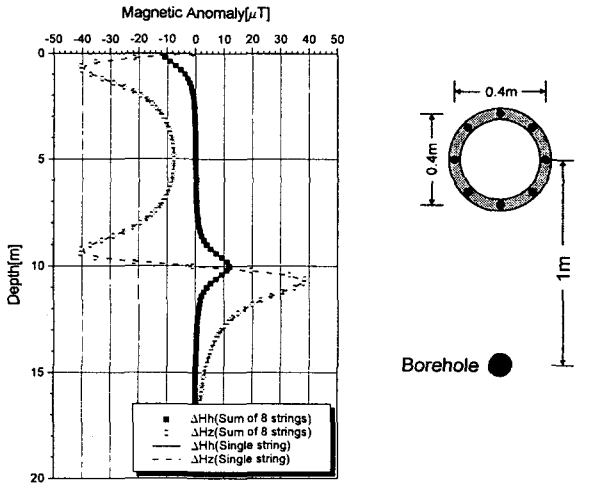

그림 3. 다중 자성체에 대한 자기이상의 합과 단일 자성체에 대한 자기이상의 비교

에 따라 자기이상이 달리 나타날 것으로 예상된다. 그림 3은 8개의 강철선으로 구성된 파일이 검측공과 1m 떨어져 있고, 강철선의 최대 이격 거리가 0.4m인 경우, 개개의 강철선에 대한 자기이상을 구하여 이를 합산한 결과와 단위 길이 당 자기 모멘트가 강철선의 8배 되는 단일 강철선이 파일의 중심부에 있다고 가정했을 때의 자기이상을 서로 비교한 것이다. 각 강철선의 자화방향은 모두 같으며, 지면에 수직인 것으로 가정하다. 그림에서 8개 강철선에 대한 자기이상의 합은 파일 중심에 있는 것으로 가정한 8배의 자기 모멘트를 갖는 한 개의 강철선에 대한 자기이상과 거의 같은 값을 보임을 알 수 있다. 이는 파일과 같이 개개의 선형 자성체로 구성된 물체인 경우 이를 하나의 그룹 자성체로 간주하고 그 위치는 그룹 자성체의 중앙으로 생각할 수 있음을 보여준다.

3. 자기이상의 해석

관측된 자기이상으로부터 단위길이 당 자기모멘트, 자성체 길이 및 자화방향 등을 구하기 위하여 역산을 수행하였다. 본 연구에서는 최소자승법을 이용한 역산 알고리즘을 사용했으며, 역산은 수회의 반복계산을 거쳐 관측된 자기이상과 가장 잘 합치되는 선형 자성체 모델을 제시한다.

3.1 수치모형 해석

그림 4는 30m길이의 선형 자성체가 지표에서부터 깊이 10m 까지 90° 의 각도로 삽입되어 있는 경우 얻어지는 자기이상에 표준편차 ±1μT의 무작위 잡음을 더한 다음(■와 ○로 표시) 이를 역산한 결과(실선과 파선으로 표시)를 보여준다. 역산에 앞서 관측자료에 FFT를 이용한 평활화를 수행하였다. 그림 왼편에 보이는 빗금친 사각형은 실제 자성체의 위치를 나타내며, 깊이 10m에 보이는 쇄선은 역산결과 얻어진 자성체 깊이를 나타낸다. 그림에서 보듯이 관측자료에 관측잡음이 많이 있는 경우에도 자성체의

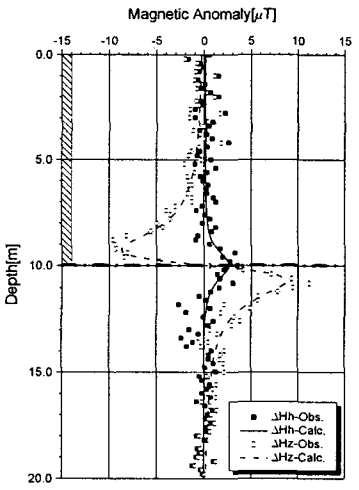

그림 4. 수치모형에 대한 자기이상과 이의 역산

심도를 정확하게 얻을 수 있음을 보여주며, 자성체의 복각이 90° 이고, 경사각 역시 90° 인 경우 자기이상 수평성분의 극대점과 수직성분의 변곡점이 자성체의 심도에서 나타나고 있음을 보여준다.

3.2 철근의 자기이상 해석

그림 5는 수직으로 놓여 있는 철근 1개에 대하여 자기이상을 측정하고 이를 역산한 결과를 보여준다. 철근의 상단은 0m 지점에, 하단은 1.12.m지점에 놓여 있으며 철근과 관측공과의 거리는 0.5m이다. 역산결과 철근의 하단이 그림에서 점선으로 표시된 바와 같이 1.01m에 있는 것으로 추정되었는데 이는 실제값과 0.11m의 오차를 보인다. 본 철근의 자화방향 중 복각이 89.8° 로 추정되었는데 이는 철근의 양 끝단이 자기 쌍극자 역할을 하고 있고, 철근의 잔류자기가 유도자기에 비해 크며, 본 철근 지자기의 복각 방향과 같은 방향, 즉 +Z 방향으로 놓여 있음을 알 수 있다.

그림 6은 앞에서와 같은 철근의 상하를 바꾸어 놓고 자기이상을 측정하고 이를 역산한 결과를 보여준다. 역산 결과 철근의 하단이 그림의 점선으로 표시된 바와 같이 1.18m에 있는 것으로 추정되었는데 이는 실제 값과 0.06m의 오차를 보인다. 본 철근의 자화방향 중 복각이 -75.78° 로 추정되었는데 이는 자기 쌍극자인 철근의 잔류자기가 유도자기에 비해 커서, 철근의 복각이 지자기의 복각 방향과 반대 방향, 즉 -Z 방향을 가리키고 있음을 보여주며, 결과적으로 자기이상의 절대치는 그림 5의 절대치에 비해 작아짐을 알 수 있다.

그림 5와 그림 6의 비교로부터 철근이 놓인 방향, 즉 자화 방향에 따라 검층곡선의 형상이 달라지는 것을 알 수 있다. 즉, 철근의 복각이 +Z 방향인 경우 자기이상의 수평성분은 철근의 상단 부근에서 극소값을, 철근의 하단 부근에서 극대값을 가지나, 철근의 복각이 -Z 방향인 경우에는 이와 반대로 철근의 상단 부근에서 극대값을, 철근의 하단 부근에서 극소값을 가진다. 자기이상의 수직성분 역시 서로 반대되는 자기이상 패턴을 보인다.

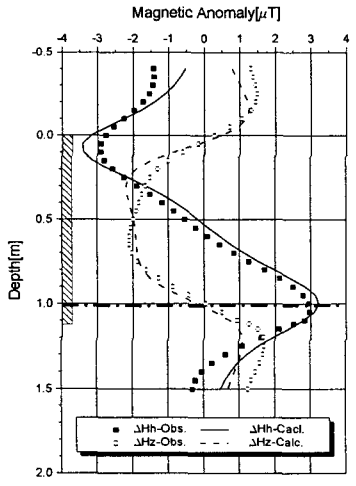

그림 5. 철근의 복각이 +Z 방향인 경우 역산결과

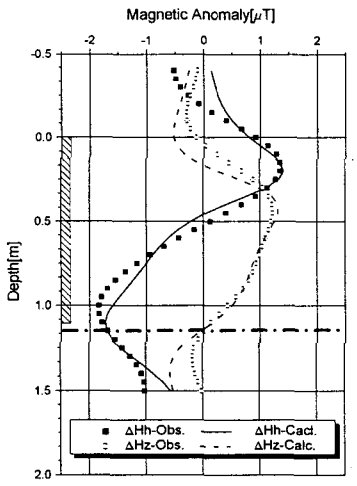

그림 6. 철근의 복각이 -Z 방향인 경우 역산결과

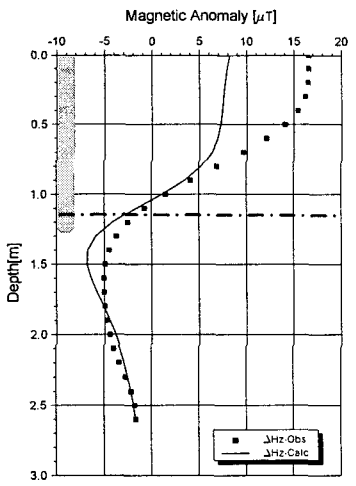

그림 7. 파일심도 예측을 위한 검층자료 역산결과

3.3 파일심도 예측

그림 7은 길이 약 2.5m의 파일을 지면에 1.25m 수직으로 묻고 자기이상의 수직성분을 측정한 후 이를 역산한 결과를 보여준다. 파일과 검측공과의 거리는 0.5m이다. 비록 파일에는 9개의 강선이 등간격으

로 분포하고 있으나 이를 파일의 중심에 있는 단일 자성체로 간주하여 역산하였다. 역산 결과 파일의 심도는 그림에서 점선으로 표시된 바와 같이 1.15m에 있는 것으로 추정되었는데 이는 실제 값과 0.1m의 오차를 보인다. 파일의 하단 부근에서 자기이상 수직성분의 변곡점 경사가 (-)를 보이는 데 이는 파일의 자화방향이 지구자기장의 복각 방향과 반대인 -Z 방향임을 암시하며, 역산 결과 파일의 복각은 -106° 로 추정되었다.

4. 결론

토목 및 건축구조물 하부에 위치한 파일의 심도를 정확히 파악하는 것은 구조물 시공 중 또는 시공 후의 구조물에 대한 안정성을 검토하고 부실시공을 사전에 예방한다는 관점에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 유한한 길이의 선형 자기쌍극자 모델을 이용하여 자력검층에 대한 반응곡선 계산과 역산을 수행하고, 이를 이용한 철근위치 및 파일 심도를 추정하였다.

유한 선형 자성체에 대한 수치모의실험 결과 잡음이 일부 포함된 검층자료도 자성체 위치와 자화방향 및 자화강도를 충분히 예측할 수 있음을 알 수 있으며, 수 개의 강선으로 제작되 파일의 경우 파일 중심에 있는 하나의 자성체로 모델링과 역산을 수행하여도 큰 오차 없이 자성체의 심도를 예측할 수 있음을 알 수 있다. 철근을 이용한 모형실험을 통하여 철근이 갖는 잔류자기가 지자장에 의한 유도자기에 비해 훨씬 큼을 알 수 있으며, 이는 철근의 상하 방향이 검층곡선 패턴에 직접적인 영향을 미침을 알 수 있다. 철근의 복각이 90° 이고 경사가 90° 인 경우 자기이상의 수평성분은 철근의 양단에서 극대점 또는 극소점을 보이며, 수직성분은 변곡점을 나타낸다. 따라서 이와 같은 검층곡선 패턴 분석은 역산과정을 거치지 않아도 현장에서 자성체의 심도를 대략 파악할 수 방법을 제시한다. 철근에 대한 자력검층 역산 결과 철근의 위치를 약 0.1m 내외의 정확도로 예측할 수 있었다. 파일의 심도 예측 결과 역시 실제 심도와 약 0.1m의 오차를 보이고 있다.

이와 같은 자력검층은 지층의 구조 파악, 파일 심도 예측, 철근의 배근상태 파악, 지하 매설물의 심도 예측 등에 활용이 가능한 것으로 보인다.

참고문헌

1. 김동수, 이광명(1998), "탄성파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴검사", **콘크리트학회지,** 제 10권, 제 2호, pp.40~49.
2. 김진후, 박경원(1998), "유한 선형 자기쌍극자에 대한 자력검층 모델링", **지구과학회지,** 제 19권, 제 6호, pp.610-615.
3. 우제윤(1995), "비파괴 시험 기법을 이용한 지반조사와 토건구조물의 안전진단 및 품질관리: 비파괴 시험기술을 이용한 현장타설 말뚝의 품질관리", **한국지반공학회 전문가 초청 학술 세미나,** pp.175~228.
4. 차영호, 신창수, 서정희(1999), "지하 파일 탐지를 위한 시추공 지력탐사 자료의 역산", **1999년도 춘계 공동학술발표회 논문집,** 대한자원환경지질학회 · 한국자원공학회 · 한국지구물리탐사학회, pp.80~85.
5. 정형기, 임무택, 박영수, 조철현, 조광호(1999), "지중 철근심도 탐지용 3성분 시추공 자기탐사시스템 개발 및 운용", **1999년도 춘계 공동학술발표회 논문집,** 대한자원환경지질학회 · 한국자원공학회 · 한국지구물리탐사학회, pp.109~111.
6. Desvignes, G., Barthes, V., and Tabbagh, A.(1992), "Direct determination of the natural remanent magnetization effect in a hole drilled in layered ground from magnetic field and susceptibility logs", **Geophysics**, Vol. 57, No. 7, pp.872~884.